

## ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION TECHNOLOGIES AND TELECOMMUNICATION

УДК 621.391.8

DOI: 10.18413/2518-1092-2018-3-3-0-5

Белов С.П.<sup>1</sup>  
Жилияков Е.Г.<sup>2</sup>  
Белов А.С.<sup>1</sup>  
Золотарь Н.И.<sup>2</sup>

### ОБ ОСОБЕННОСТЯХ МОНИТОРИНГА ЗАНЯТОСТИ ЧАСТОТНЫХ РЕСУРСОВ КАНАЛОВ СВЯЗИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ИНФОРМАЦИИ КОГНИТИВНЫМИ СИСТЕМАМИ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

<sup>1</sup> Белгородский университет кооперации, экономики и права, ул. Садовая, д. 116а,  
г. Белгород, 308023, Россия

<sup>2</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы д. 85,  
г. Белгород, 308015, Россия

*e-mail: belovssergei@gmail.com, Zhilyakov@bsu.edu.ru, belov\_as@bsu.edu.ru, zolotar\_kola@mail.ru*

#### Аннотация

Стремительное развитие беспроводных систем связи приводит к постоянному усложнению методов регулирования использования частотного спектра. Число услуг беспроводной связи растет и требуется выделение все большего числа диапазонов частот для их обеспечения. Помехи от одновременно используемых в одном частотном диапазоне радиопередатчиков приводят к значительным искажениям в передаваемой информации и могут значительно затруднять работу телекоммуникационных систем различного назначения. Достижения в сфере программно-ориентированных радиосистем и в частности когнитивного радио позволяют решить указанные проблемы. В существующем стандарте когнитивного радио IEEE 802.22 используются различные подходы к детектированию сигнала первичного пользователя канала. Высокая точность детектирования сигнала необходима для стабильной работы сенсинга когнитивного радио и всей системы в целом. Каждый метод, применяемый в стандарте IEEE 802.22, имеет свои преимущества и недостатки. Применение того или иного метода зависит от условий радиообстановки. В статье проводится анализ методов детектирования применяемых в стандарте когнитивного радио путем имитационного моделирования в среде MATLAB.

**Ключевые слова:** когнитивное радио; детектирование сигнала первичного пользователя; имитационное моделирование в среде MATLAB.

UDC 621.391.8

Belov S.P.<sup>1</sup>  
Zhilyakov E.G.<sup>2</sup>  
Belov A.S.<sup>1</sup>  
Zolotar N.I.<sup>2</sup>

### ABOUT FEATURES OF MONITORING OF EMPLOYMENT OF FREQUENCY RESOURCES OF COMMUNICATION CHANNELS AT THE COMMUNICATION OF INFORMATION BY COGNITIVE WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS

<sup>1</sup> Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, 116a Sadovaya St., Belgorod, 308023, Russia

<sup>2</sup> Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia

*e-mail: belovssergei@gmail.com, Zhilyakov@bsu.edu.ru, belov\_as@bsu.edu.ru, zolotar\_kola@mail.ru*

#### Annotation

The rapid development of wireless communication systems leads to a constant complication of methods for regulating the use of the frequency spectrum. The number of wireless communication services is growing and more and more frequency bands need to be allocated to provide them. Interference from simultaneously used in one frequency range of radio transmitters leads to significant distortions in transmitted information and can significantly hinder the

operation of telecommunication systems for various purposes. Achievements in the field of software-oriented radio systems and, in particular, cognitive radio allow solving these problems. The existing standard of IEEE 802.22 cognitive radio uses different approaches to detecting the signal of the primary user of the channel. High accuracy of signal detection is necessary for stable operation of sensing of cognitive radio and the whole system. Each method used in the IEEE 802.22 standard has its advantages and disadvantages. The application of this or that method depends on the radio conditions. The article analyzes methods for detecting the cognitive radio used in the standard by simulation in the MATLAB environment.

**Keywords:** cognitive radio; primary signal detection; simulation in MATLAB environment.

## ВВЕДЕНИЕ

Подход к построению интеллектуальных систем беспроводной связи, получивший название когнитивное радио, является передовой технологией, позволяющей обеспечить рациональное использование радиочастотного спектра [1-2]. Кроме того, знание о состоянии спектра может быть применено для принятия решения запуска расширенных алгоритмов приемника, а также адаптивного подавления помех [3]. Одной из основных задач при работе когнитивного радио, является проведение постоянного сенсинга (мониторинга) радиочастотного спектра на условие отсутствия первичного пользователя и поиска новых свободных участков на случай необходимости перестроиться на другую частоту [4].

Предполагается, что сенсинг основывается на двух этапах: быстрый и точный сенсинг [4-6]. На этапе быстрого сканирования используется алгоритм грубого сенсинга, например, используется детектор энергии. Стадия точного сенсинга инициируется на основе результатов быстрого сенсинга. Точный мониторинг включает более подробное определение состояния занятости радиочастотного спектра, где уже применяются более сложные и точные методы. Это необходимо для устранения неопределенности [7], которая может возникнуть при сборе информации вторичным пользователем о состоянии занятости частотных ресурсов канала связи и таким образом повлиять на производительность работы когнитивной системы. Несколько методов, которые были предложены и включены в проект стандарта, включают детектирование энергии, сенсинг по форме волны (обнаружение последовательности PN511 или PN63 и/или обнаружение синхронизации сегмента), детектирование по циклостационарным признакам и применение согласованного фильтра. Базовая станция может распределять нагрузку по сенсингу между абонентскими станциями. Результаты поступают в базовую станцию, которая использует эти результаты для управления передачами.

В общем виде сканирования спектра можно выразить как задачу бинарной проверки гипотезы:  $H_0$  – первичный пользователь отсутствует,  $H_1$  – первичный пользователь работает со спектром. Вероятность корректного обнаружения первичных пользователей  $P_d$  и вероятность ложной тревоги  $P_f$  имеют важное значение для оценки эффективности обнаружения и определяются как:

$$\begin{aligned} P_d &= P\{\text{decision} = H_1\} | H_1 \\ P_f &= P\{\text{decision} = H_1\} | H_0 \end{aligned} \quad (1)$$

Одной из групп методов сканирования спектра является метод обнаружения передатчика – метод основанный на обнаружении вторичными пользователями слабого сигнала от первичного передатчика. Обобщенная модель метода обнаружения передатчика может быть выражена как:

$$x(n) = \begin{cases} w(n) & H_0 \\ y(n) + w(n) & H_1 \end{cases} \quad (2)$$

где  $x(n)$  – принятый сигнал,  $y(n)$  – передаваемый сигнал,  $w(n)$  – шум.

$H_0$  – нулевая гипотеза, согласно которой в определенной полосе частот нет первичных пользователей, а  $H_1$  указывает на наличие первичных пользователей в данной полосе частот [8].

Для оценки эффективности наиболее широко используемых в настоящее время в системах когнитивного радио методов мониторинга занятости частотных ресурсов каналов связи проведем их имитационное моделирование.

### **ОБНАРУЖЕНИЕ ЭНЕРГИИ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ В АДДИТИВНОМ ШУМЕ**

$H_0$ : последовательность отсчетов является некоторой случайной последовательностью  $\vec{u}$  с нулевым математическим ожиданием, дисперсией и гауссовским распределением, так что корреляционная функция равна [9]:

$$R_{\tau} = \begin{cases} \sigma_u^2, & \tau = 0 \\ 0, & \tau \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

Альтернативная гипотеза:  $H_1 = \bar{H}_0$ : выборка состоит из смеси шума и сигнала

$$x_i = s_i + u_i, \quad (4)$$

где  $s_i$  – сигнал,  $i=1, \dots, N$ .

Решение в пользу той или иной гипотезы принимается при обработке фиксированных  $N$  отсчетов.

Тогда отношение правдоподобия равно:

$$g(\vec{x}) = \exp\left[-\frac{m_1 - m_0}{2\sigma_u^2} \sum_{i=1}^N \left(x_i - \frac{m_1 + m_0}{2}\right)\right]. \quad (5)$$

Принятие решения в пользу  $H_0$  принимается тогда, когда (начальная гипотеза более правдоподобна):

$$g(\vec{x}) \geq h > 1. \quad (6)$$

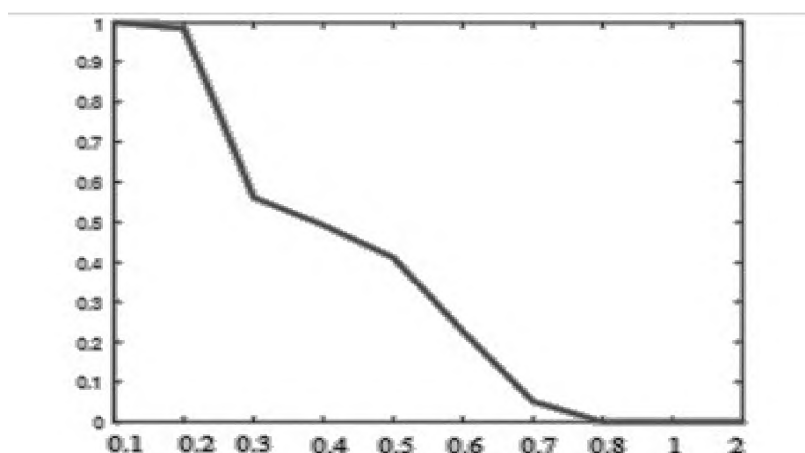


Рис. 1. Зависимость вероятностей ошибок процедуры обнаружения сигнала в аддитивном шуме от отношения сигнал/шум (от 0,1 до 2)

Fig. 1. Dependence of the error probabilities of the signal detection procedure in additive noise on the signal-to-noise ratio (from 0.1 to 2)

## ОБНАРУЖЕНИЕ ЭНЕРГИИ СИГНАЛОВ С НЕИЗВЕСТНОЙ ЧАСТОТОЙ В АДДИТИВНОМ ШУМЕ

Пусть начало и длительность сигнала  $s_i = a_i \cos(\omega_0 i)$  известны, но неизвестна частота  $\omega_0$ . Логарифмическое отношение правдоподобия для произвольного значения круговой частоты будет иметь вид:

$$l(\vec{x} / \omega) = -\frac{1}{2\sigma_u^2} \sum_{i=1}^N [a_i^2 \cos^2(\omega i) - 2x_i a_i \cos \omega i] \quad (7)$$

При выполнении нулевой гипотезы (сигнал отсутствует) случайная величина будет гауссовской с нулевым математическим ожиданием и дисперсией. Поэтому целесообразно использовать неравенство:

$$|l(\vec{x} / \omega)| > h(\omega), \quad (8)$$

выполнение которого принимается за признак несправедливости нулевой гипотезы.

Граница критической области зависит от выбираемой частоты. Должно выполняться равенство:

$$h(\omega) = D_l(\omega) h_{\alpha/2}, \quad (9)$$

где имеет место:

$$\alpha = 2(1 - F(h_{\alpha/2})). \quad (10)$$

Вероятность превышения этого порога при наличии сигнала определяется соотношением

$$1 - \beta = 2(1 - F(h_{\alpha/2} - M(l(\vec{x} / \omega) / D_l(\omega))) \quad (11)$$

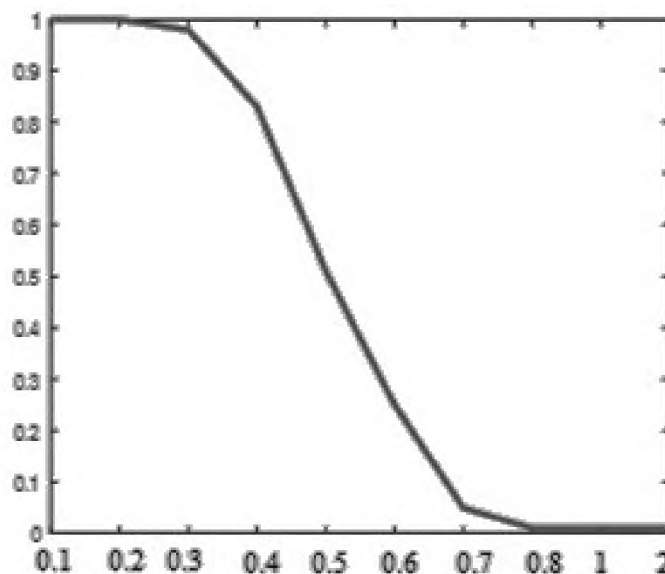


Рис. 2. Зависимость вероятностей ошибок процедуры обнаружения сигнала в аддитивном шуме от отношения сигнал/шум (от 0,1 до 2)

Fig. 2. Dependence of the error probabilities of the signal detection procedure in additive noise on the signal-to-noise ratio (from 0.1 to 2)

## ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ПО ПРИЗНАКАМ ЦИКЛИЧЕСКОЙ СТАЦИОНАРНОСТИ

Принимаемый сигнал  $x(t)$  считается циклостационарным, если его математическое ожидание и автокорреляция имеет признаки периодичности:

$$m_x(t+T_0) = m_x(t) \quad (12)$$

$$R_x(t+T_0, u+T_0) = R_x(t, u) \quad (13)$$

где период мат. ожидания и автокорреляции равен  $T_0$ . Если  $t$  и  $u$  заменить в автокорреляционном уравнении на  $t+\tau/2$  и  $t-\tau/2$ , то получим

$$R_x\left(t + \frac{\tau}{2}, t - \frac{\tau}{2}\right) = \sum R_x^\alpha(\tau) e^{j2\pi\alpha t} \quad (14)$$

где  $R_x^\alpha$  представляет собой циклическую автокорреляционную функцию (CAF), а  $\alpha$  обозначает циклическую частоту. Предполагается, что циклическая частота – это известный параметр на приемной стороне. CAF вычисляется следующим образом:

$$R_x^\alpha(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-1/T}^{1/T} R_x\left(t + \frac{\tau}{2}, t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi\alpha t} dt \quad (15)$$

Циклическая спектральная плотность (CSD) получается так:

$$S_x^\alpha(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x^\alpha(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (16)$$

Сигналы, передаваемые основными пользователями, в основном содержат циклические префиксы, расширяющиеся кодовые последовательности и т.п., которые имеют периодичность в их статистике, как математическое ожидание и автокорреляция. Когда вычисляется CSD для таких сигналов, это помогает выделять такие периодичности. Преобразование Фурье коррелированного сигнала приводит к пику на частотах, которые являются специфическими для сигнала, и поиск этих пиков помогает в определении присутствия основного пользователя, тогда как шум является случайным по своей природе и он не проявляет таких периодичностей, поэтому он не выделяется в процессе корреляции [10]. Это можно пронаблюдать на полученных графиках (рис. 3-5).

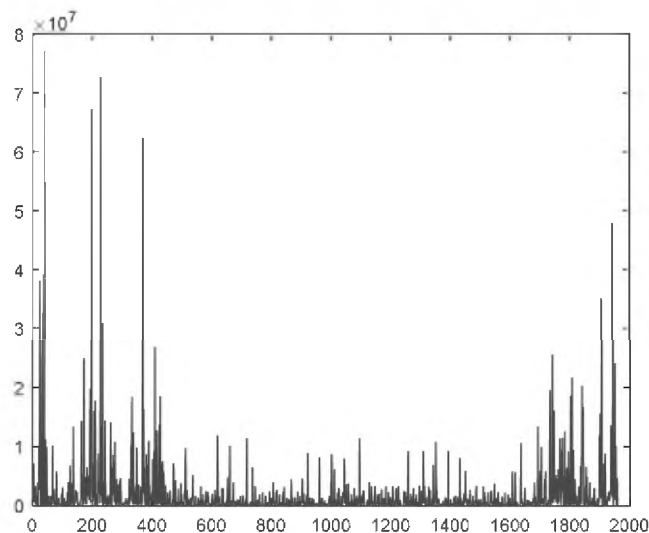


Рис. 3. Циклическая спектральная плотность для сигнала + шум  
Fig. 3. Cyclic spectral density for the signal + noise



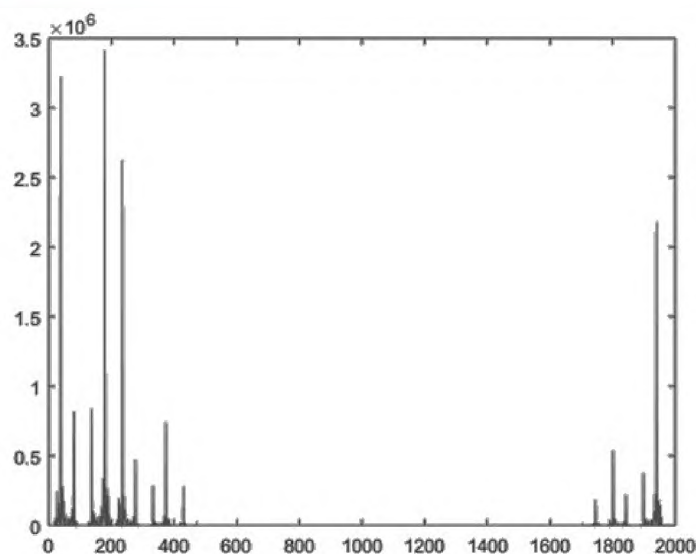


Рис. 4. Циклическая спектральная плотность сигнала без шума  
Fig. 4. Cyclic spectral density of the signal without noise

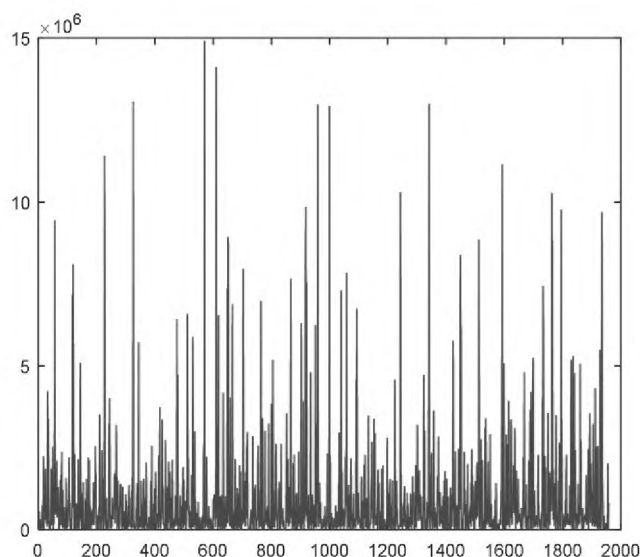


Рис. 5. Циклическая спектральная плотность шума  
Fig. 5. Cyclic noise spectral density

### **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ**

Анализ эффективности предложенных методов детектирования проведен в среде MATLAB с помощью имитационного моделирования. В качестве критерия эффективности выбрана вероятность общей ошибки  $p_{ош}$ .

Из графика, представленного на рисунке 6 видно, что наиболее эффективным методом в условиях низких значений отношения сигнал/шум является метод детектирования по признакам циклической стационарности.

Методы детектирования энергии при высоком уровне шума в линии связи имеют высокую вероятность ошибки обнаружения сигнала первичного пользователя канала. В плане сложности, детектор энергии проще в реализации и требует меньше вычислительной мощности в сравнении с методом детектирования по признакам циклостационарности. Поэтому эти методы принято использовать вместе в когнитивном радио, при быстром сенсинге где нет требования высокой

точности детектирования и точном сенсинге, где проводится более тщательное сканирование спектра. Проблема с определением первичного пользователя связана со свойствами реальных каналов связи. Многолучевое затухание, затенения, и другие факторы вынуждают систему когнитивного радио работать в условиях сложной помеховой обстановке. Некоторые лицензированные сигналы (например, цифровое телевидение) должны быть детектированы при низком значении SNR.

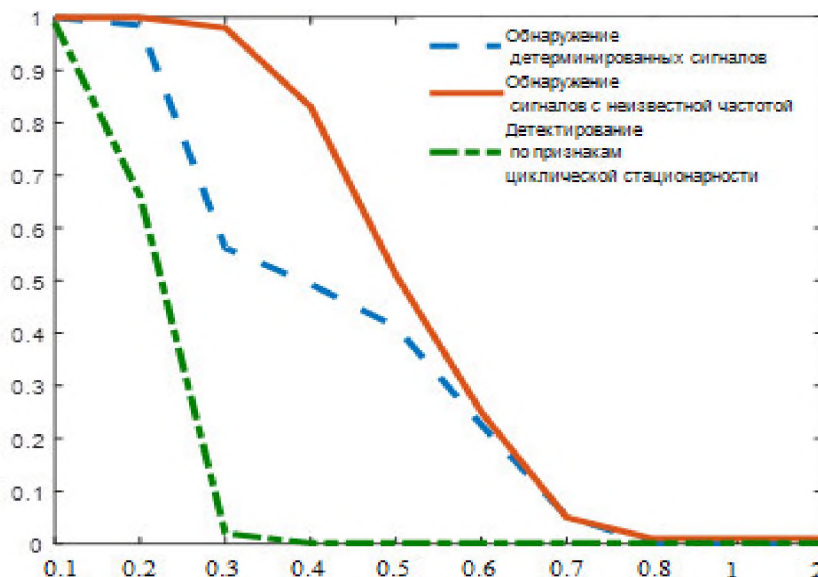


Рис. 6. Сравнительный график трех методов детектирования сигнала  
Fig. 6. Comparative graph of three methods of signal detection

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из проведенного анализа видно, что даже наиболее точный метод детектирования по циклостационарности при низких значениях сигнал/шум не может гарантировать точность определения. В таких случаях система может сталкиваться с проблемой неопределенности присутствия первичного пользователя. Поэтому для стабильности работы системы необходимо применять дополнительные инструменты из области методов принятия решения.

*Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-07-00268*

## Список литературы

1. Гурьянов, И.О. Когнитивное радио: новые подходы к обеспечению радиочастотным ресурсом перспективных радиотехнологий / И.О. Гурьянов // Электросвязь. 2012. № 8. С. 5-8.
2. C. R. Stevenson, C. Cordeiro, E. Sofer. "Functional requirements for the 802.22 WRAN standard," IEEE 802.22-05/0007r46, Sept. 2005.
3. J. Andrews. "Interference cancellation for cellular systems: a contemporary overview," IEEE Wireless Commun. Mag., vol. 12, no. 2, pp. 19–29, 2005.
4. C. Cordeiro, K. Challapali, and D. Birru. "IEEE 802.22: An introduction to the first wireless standard based on cognitive radios" Journal of communications, vol. 1, no. 1, Apr. 2006.
5. Standard for Wireless Regional Area Networks (WRAN) – Specific requirements - Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and procedures for operation in the TV Bands, The Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc. Std. IEEE 802.22.
6. Draft Supplement to STANDARD FOR Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Specification for Radio Resource Measurement, The Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc. Std. IEEE 802.11k/D0.7, Oct. 2003.

7. D. Dubois and H. Prade, "Possibility theory in information fusion. Third Intern. Conf. Information Fusion, 2000.
8. Ролич, М.Л. Методы обнаружения первичных пользователей в когнитивных радиосетях / М.Л. Ролич // Молодой ученый. 2015. № 20. С. 70–73.
9. Теория и методы статистических решений в радиотехнике и связи: учебное пособие / Жилияков Е.Г., Фирсова А.А. – Белгород: Изд-во НИУ «БелГУ», 2014. 51-67с.
10. R. Kumar. "Analysis of Spectrum Sensing Techniques in Cognitive Radio" International Journal of Information and Computation Technology, vol. 4, no. 4, 2014 pp. 437-444.

### References

1. Guryanov, I.O. Cognitive radio: new approaches to providing radio frequency resources of promising radio technologies / I.O. Guryanov // *Electrosvyaz*. 2012. No. 8. P. 5-8.
2. C. R. Stevenson, C. Cordeiro, E. Sofer. "Functional requirements for the 802.22 WRAN standard," IEEE 802.22-05 / 0007r46, Sept. 2005.
3. J. Andrews. "Interference cancellation for cellular systems: a contemporary overview," IEEE Wireless Commun. Mag., Vol. 12, no. 2, pp. 19-29, 2005.
4. C. Cordeiro, K. Challapali, and D. Birru. "IEEE 802.22: An introduction to the first wireless standard based on cognitive radios" Journal of Communications, vol. 1, no. 1, Apr. 2006.
5. Standard for Wireless Regional Area Networks (WRAN) - Specific requirements - Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and procedures for the TV Bands, The Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc. Std. IEEE 802.22.
6. Draft Supplement to STANDARD FOR Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN / MAN Specific Requirements - Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Specification for Radio Resource Measurement, The Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc. Std. IEEE 802.11k / D0.7, Oct. 2003.
7. D. Dubois and H. Prade, "Possibility theory in information fusion. Third Intern. Conf. Information Fusion, 2000.
8. Rolich, M.L. Methods for detecting primary users in cognitive radio networks / M.L. Rolich // *Young Scientist*. 2015. No. 20. P. 70-73.
9. Theory and methods of statistical solutions in radio engineering and communications: Textbook / Zhilyakov EG, Firsova AA - Belgorod: Publishing house of the National Research University "BelGU", 2014. 51-67 s.
10. R. Kumar. "Analysis of Spectrum Sensing Techniques in Cognitive Radio" International Journal of Information and Computation Technology, vol. 4, no. 4, 2014 pp. 437-444.

**Белов Сергей Павлович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры организации и технологии защиты информации

**Жилияков Евгений Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-телекоммуникационных систем и технологий

**Белов Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры организации и технологии защиты информации, к.т.н., Белгородский университет кооперации

**Золотарь Николай Иванович**, аспирант кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий

**Belov Sergey Pavlovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Organization and Technology of Information Protection

**Zhilyakov Evgeny Georgievich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies

**Belov Alexander Sergeevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Organization and Technology of Information Protection

**Zolotar Nikolai Ivanovich**, postgraduate student of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies